基于 SCI 文献计量分析的土壤电动修复研究

袁立竹[1]，盛宇平[2*]，盛春蕾[3]，郭书海[1*]

（1.中国科学院沈阳应用生态研究所，辽宁沈阳，110016； 2.长春师范大学，吉林长春，130032； 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所，吉林长春，130102）

摘要：土壤电动修复是一种新兴的土壤修复技术。本文以 1972-2017 土壤电动修复 SCI 文献为分析对象，通过定量统计和文本挖掘对过去 45 年土壤电动修复发展历程和研究态势进行了描述。根据对关键词的整理与分析，发现土壤电动修复研究主要围绕电动修复机理、联合修复技术和场地应用等 3 个方面，重点修复对象主要是重金属、有机污染物、盐和其他离子以及复合污染物等。开发便捷高效的电动修复场地应用技术将是今后的研究重点之一；电动修复技术与其他修复技术的有机结合，联合修复已成为电动修复研究的热点。

关键词：土壤电动修复；文献计量分析；污染土壤

Electrokinetic soil remediation based on SCI-bibliometrical analysis

Yuan Lizhu[1], Sheng Yuping[2], Sheng Chunlei[3], GuoShuhai[1]

(1Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning110016, 2Changchun Normal University, Changchun, Jilin Province130032, 3 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin130102)

Abstract: Electrokinetic soil remediation (EKSR) is an emerging soil remediation technology. This study takes the 1972-2017 EKSR SCI literature as the analysis object. The development history and research situation of EKSR in the past 45 years are described by quantitative statistics and text mining. According to the collation and analysis of the keywords, it is found that the research on EKSR mainly focuses on three aspects: electric repair mechanism, joint repair technology and field application.

1基金项目：中国科学院 2017 年文献情报院所协同项目“领域知识组织体系建设”(ICP2017-15)

作者简介：袁立竹（1987-）, 男，助理研究员，研究方向：从事重金属污染土壤电动修复研究

通讯作者：盛宇平（1990- ），男，博士研究生，研究方向：历史文献计量学。E-mail: yuping_sheng@163.com

郭书海（1964-），男，辽宁沈阳人，研究员，从事污染土壤修复与风险防控研究。E-mail：shuhaiguo@iae.ac.cn

The main targets are heavy metals, organic pollutants, salt and other ions and composite pollutants， etc. The development of convenient and efficient electric repair field application technology will be one of the research priorities in the future; the combination of electric repair technology and other repair technologies, joint repair has become a hot spot in electric repair research.

Key words: Electrokinetic soil remediation, bibliometrical analysis, contaminated soil

1 前言

矿业开采和加工、电镀等工业生产以及污水灌溉、化肥农药的使用等农业生产过程导致大量的重金属和有机污染物在土壤中积累。土壤污染及其引起的生态风险、食品安全以及通过食物链对人体产生的健康风险问题受到越来越多的关注[1, 2]。

据 2014 年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国土壤环境状况总体不容乐观，点位超标率为 19.4%。据报道，目前我国受镉、砷、铬、铅等重金属污染的耕地面积近 2000 万公顷，约占总耕地面积的 1/5[3]。因此，实现污染土壤的修复对于保护生物多样性，维持生态平衡，保证粮食安全生产等具有非常重要的意义。20 世纪 80 年代以来，世界上许多国家特别是发达国家均制定并开展了污染土壤治理与修复计划，因此也形成了一个新兴的土壤修复行业。在土壤修复行业中，已有的土壤修复技术达到一百多种，常用技术也有十多种，大致可分为物理、化学和生物三种方法。电动修复技术（electrokinetic remediation,EK）是一项新兴的土壤修复技术，该技术综合了土壤化学、环境化学、电化学和分析化学等交叉的研究领域，它主要是通过在污染土壤两侧施加直流电压形成电场梯度，土壤中的污染物质在电场作用下通过电迁移、电渗流或电泳的方式被带到电极两端从而清洁污染土壤[4]。 它具有运行成本低，容易自动化操作，能够进行原位修复，能量效率高，对于低渗透性土壤很有效等优点[5]。

为全面了解有关土壤电动修复的总体发展态势及热点研究内容，本文利用 Web of Science 核心合集数据库进行文献检索，利用德温特数据分析软件(Derwent Data Analyzer)进行文本挖掘与统计分析，结合 ESI 近十年的热点文献，

概述了过去45年来土壤电动修复领域的研究态势，通过对关键词的整理与分析，发现土壤电动修复的研究主要从技术原理、去除的污染物、技术联合运用及实际场地应用等方面重点开展工作。本文旨在为科研管理部门制定学科发展战略规划及相关的科学研究提供快捷、客观的信息支撑。

2. 数据来源与分析方法

本文以SCI-E（Science Citation Index Expanded）数据库为数据源，首先利用检索式（TS=electrokinetic* and soil）不限定文献类型，发文年份时间跨度为1900-2017（数据检索、下载时间为2017年10月16日），共检索到1587篇文献，提取作者关键词制作土壤电动修复叙词表，再根据叙词表进行扩检与匹配并结合专业科研人员的人工判读，最终得到1972年以来土壤电动修复文献1377篇精准文献集合。应用利用德温特数据分析软件 (Derwent Data Analyzer)文本挖掘软件对精准文献进行文本整理、深度挖掘与统计分析。

3.结果与讨论

3.1 土壤电动修复技术SCI文献概述

1972年，发表在《Soviet Soil Science》出版物上，由Parshina，S.M.撰写的《EFFECT OF ELECTROKINETIC PROPERTIES OF SOIL ON TRANSPORT OF CHLORITES》是土壤电动修复的首篇SCI论文。上世纪70年代只有俄罗斯专家在土壤电动修复领域发表了2篇SCI论文，80年代由美国学者发表了3篇研究论文，1991年之后相关论文数量剧增，即进入快速增长期，到2016年达到了高峰，年度发文110篇（图1）。

从发表论文总量上看，45年发文总数量并不多，但近二十年却呈逐年增长趋势。这表明土壤电动修复技术尽管起步较晚，但因为它是一种处理土壤污染的绿色技术，所以发展较快，现已成为当前土壤修复研究领域的热点。中国从1992年开始发表土壤电动修复SCI论文，是由中国科学院南京土壤研究所的ZHANG, H撰写的《ELECTROKINETIC PROPERTIES OF FERRALSOLS IN CHINA IN RELATION TO PEDOGENIC DEVELOPMENT》发表在《GEODERMA》, 目前中国科学家发文总量239篇，位居世界第二。

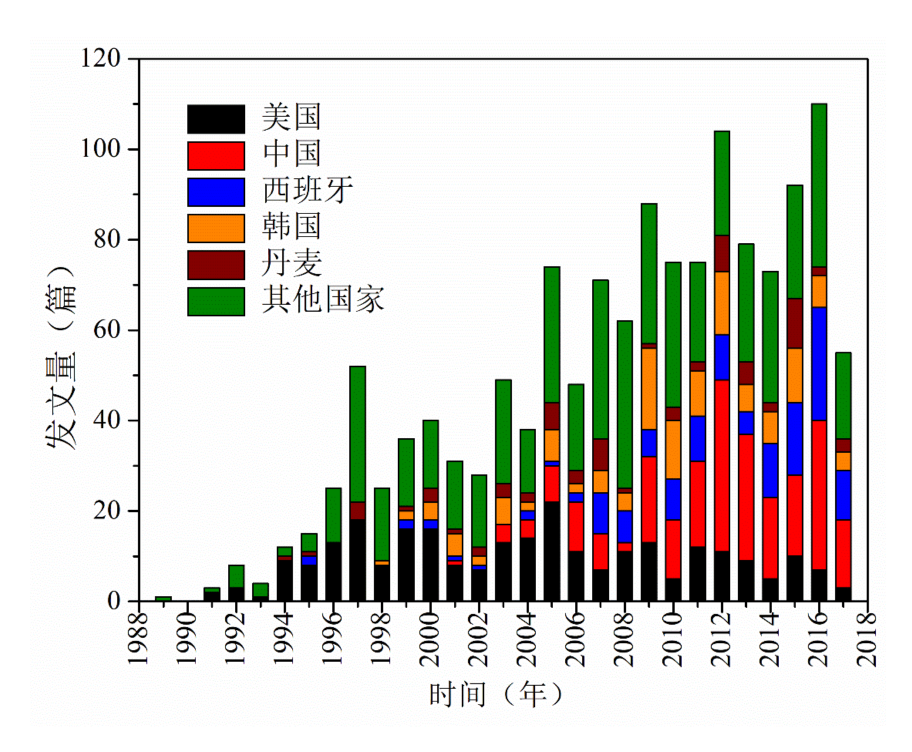


图 1 主要国家电动修复年发文量分布情况

Fig. 1 Annual distribution ofelectrokinetic remediation research inmajor countries

1377 篇精准文献中 article 占 84%， proceedings paper 占 23%， review 占 4%。在引文次数方面，1972 年发表第一篇论文，时隔 3 年后于 1975 年开始被引用，到 2017 年总被引次数为 27652 次，施引文献 11567 篇。其中 1993 年到 2012 年近 20 年的时间里发文的被引次数持续较高，2005 年发表的论文被引用次数最多，为 2328 次；这表明土壤电动修复技术已经引起人们的普遍关注，其影响力不容忽视。

共有 57 个国家的科技工作者发表与该领域相关的论文，发文主要集中在:美国（262 篇）、中国（239 篇）、西班牙（133 篇）、南韩（131 篇）和丹麦（72 篇）等。主要的发文机构依次为: 丹麦科技大学（68 篇）、美国伊利诺斯大学（62 篇）、中国科学院（58 篇）、西班牙的比戈大学（49 篇）、西班牙的卡斯蒂利亚-拉曼查大学（38 篇）和葡萄牙的新里斯本大学（33 篇），其中丹麦科技大学、葡萄牙的新里斯本大学、西班牙的马拉加大学和智利的费德里科圣玛丽亚科技大学形成最强大的合作联盟，其次是美国伊利诺斯大学和西班牙的比戈大学，中国科学院和美国的东北大学具有较强的合作关系。这些学术论文主要发表在:JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS，ELECTROCHIMICA

ACTA，CHEMOSPHERE，SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY 和 SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY 等刊物上。

3.2 土壤电动修复原理与修复对象

对 1377 篇精准文献，针对标题、摘要及作者关键词进行拼写整理、主题聚类与统计分析，经主题聚类归并为 35 个主题。按照电动修复作用对象，可分为无机污染物、有机污染物和电动修复技术机理（图 1），其中，无机污染土壤电动修复研究较早，研究论文所占的百分比最多，2005 年以前，有机污染土壤电动修复研究较少，从 2005 年开始快速发展起来，虽然起步较晚，但是发展迅速。

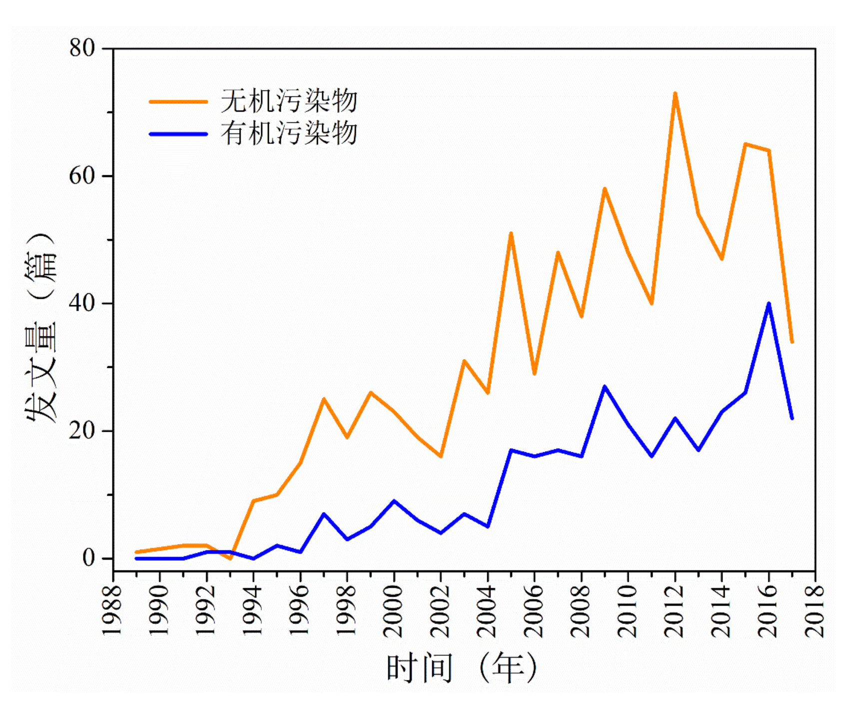


图 2 无机、有机污染土壤电动修复研究年发文量分布图

Fig. 2 Annual distribution ofelectrokinetic remediation research oninorganic and organic contaminated soil

3.2.1 土壤电动修复技术原理

土壤电动修复技术起始于上世纪 80 年代，主要用于去除土壤中的重金属（铜、锌、铅、镉、镍、砷、汞、锰等）、放射性元素和某些有机污染物，主要的去除机理是利用电场作用产生的各种电动效应电渗析、电迁移、电泳和扩散等作用将污染物从土壤中去除[4]。在电场作用下，带电土壤颗粒发生运动引起溶液移动，从而形成电渗流；电迁移即为带电离子在电场作用下的迁移作用；

电泳则是指土壤溶液中的带电胶体微粒在电场作用下发生的迁移；扩散是指由于浓度梯度而导致的化学物质运动[6]。对于重金属等离子型污染物，主要通过电迁移的形式从土壤中去除[7]，对于非离子型污染物，电渗流是主要的去除方式[8]。

在电动修复过程中，电极反应是影响电动修复效率的重要因素。电极插入受污染土壤中，连接电源，会发生一系列的电化学反应，其中电解水是最主要的电解反应，阳极发生氧化反应，产生大量的氢离子，阴极发生还原反应，产生大量的氢氧根离子，在电场的作用下，氢离子和氢氧根离子向土壤中迁移，影响着土壤酸碱性，进而影响土壤重金属等离子的存在形式以及土壤微生物等的活性等[5]。可见，电动修复过程中电极反应导致的 pH 变化对电动修复有重要影响，有大量研究者对电动修复过程中土壤 pH 的变化和调控进行研究[9]。

3.2.2 修复对象

前文已述，土壤电动修复主要去除的是土壤中的重金属污染物、放射性元素等无机污染物。早在上世纪 80 年代，荷兰 Geokinetics 公司首次开展了针对重金属污染土壤的电动修复研究。随后美国的 Alshawabkeh 等[10]采用电动修复方法，成功修复了位于加利福尼亚州 Point Mugu 海军航空站的镉（5～20 mg/kg）和铬（180～1100 mg/kg）污染土壤。目前，电动修复在重金属污染土壤中的应用广泛，主要集中在镉、铜、铅、锌、镍、汞和铬等重金属。

在电动修复重金属污染土壤过程中，土壤 pH 环境和土壤中重金属的存在形式是影响电动修复重金属污染土壤的重要因素，因此有大量研究探索采用不同的方式调控土壤 pH。目前应用较多的主要有采用强酸、弱酸、螯合剂、络合剂和表面活性剂等溶液来调节土壤 pH 环境，增强土壤中污染物活性，从而提高去除效率[11-13]。同时也有大量研究采用离子交换膜[14]、循环电解液[15]和极性切换[16]等方式来调控土壤 pH 环境，也均取得了较好的效果。目前关于电动修复重金属污染土壤已经有大量的中试和场地修复研究，Kim 等[17, 18]对某锌冶炼厂附近砷、铅和铜污染稻田采用电动修复技术进行场地修复研究，经过 24 周的处理，对砷、铜、铅的去除率为 44.4%、40.3%和 46.6%。

研究证明，电动修复技术可用于放射性元素修复，但是目前研究仍然较少。Parker 等[19]研究构建了一个评价从水饱和的水泥中电动去除放射性元素的模型，

该模型被设计成类似于结构混凝土被放射性水溶液所饱和的环境，通过使用各种混凝土组合物和水泥厚度来研究电动技术的效率。

在 2005 年以前，电动修复有机污染土壤研究较少，Acar 等[20]采用电动修复技术去除高岭土中的苯酚，研究发现，吸附在高岭土上 85%-95%的苯酚被去除，研究认为，利用直流电法将低浓度的有机污染物从粘性土壤中去除是可行的。对于疏水性有机化合物，通过使用表面活性剂和助溶剂提高疏水性有机污染物的解吸和溶解，然后施加电场通过电渗析流和电泳过程来促进污染物的迁移从而从土壤中去除[21]。目前电动修复技术广泛应用于不同有机污染物的去除，例如多环芳烃[22]、多氯联苯[23]、石油[24]和农药[25]等。

3.2.3 应用范围

虽然电动修复技术是一种新型修复技术，但是发展迅速，目前已有大量中试和场地应用的研究报道。早在 20 世纪 90 年代，荷兰的 Lageman 对 Pb、Cu 污染的土壤进行了场地修复研究，土壤中铅浓度为 300~1000 mg/kg，铜浓度为 500~1000 mg/kg。电动修复处理每天通电 10 小时，经过 43 天处理后，铅的去除率达 70%，铜的去除率达 80%，能量消耗为 65 kW/m。另外，还研究了 As、Zn 污染土壤的现场电动修复，经过 7 周的处理将 As 的浓度由 400~500 mg/kg 降低到 30 mg/kg，8 周内可将 Zn 的浓度由 2410 mg/kg 降低到 1620 mg/kg。到 1994 年，已经先后应用电动修复技术在荷兰开展了 5 个大规模的场地修复试验来处理铅、铜、锌、砷、镉、铬、镍等污染的土壤[26]。Kim 等开展了大量电动修复场地应用研究，讨论了电极排列方式，电极排列密度以及阴极 pH 调控等对场地修复重金属污染土壤的影响[17, 18, 27]。我国也开展了大量的电动修复场地应用研究，郭书海等[28]在山东东营、辽宁盘锦等多地采用电动-微生物联合修复技术修复石油污染土壤，并取得了较好效果。目前，电动修复技术的机理已基本明晰，如何将电动修复技术应用于实际修复中将成为今后的研究热点，开发便捷高效的电动修复场地应用系统技术和系统设备将是今后的研究重点。

3.3 联合修复技术

电动修复技术是一种新型的环境修复技术，但是在实际应用中仍存在各种不足，因此电动修复技术常常与其他修复技术联用，从而提高修复效率。联合修复技术与单一修复技术相比，效果大多优于后者，因此，联用技术可以更好地完成土壤修复这一目的，联合技术已成为电动修复技术研究的热点。常见的联合修复技术主要包括：电动-氧化联合修复技术、电动-生物联合修复技术、电动-渗透反应墙联合修复技术、电动-离子交换膜联合修复技术和电动-植物联合修复技术等（图 3）。从图 3 可以看出，电动修复联合修复技术从 1994 年开始应用，1996 年出现多种电动联合修复技术，其中，电动-氧化联合修复技术和电动-生物修复技术随后迅速发展，是目前电动联合修复中研究较多的两种修复技术。电动-植物联合修复技术起步较晚，2003 年第一次有文献报道。

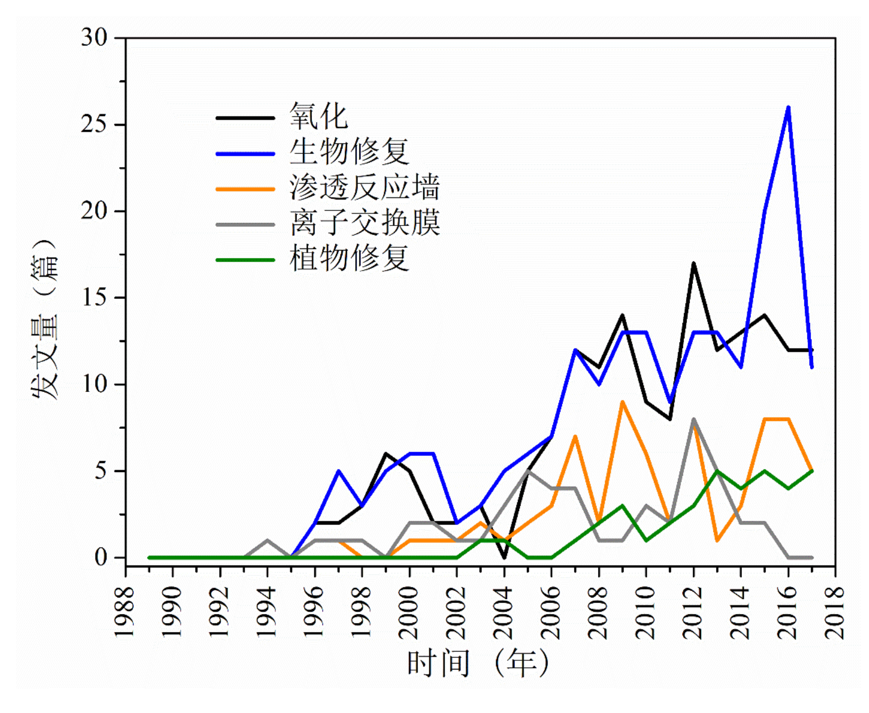


图 3 联合修复技术年发文量分布图

Fig. 3 Annual distribution ofelectrokinetic remediation combined with other technology

3.3.1 电动-氧化联合修复技术

电动修复技术和氧化修复技术联合应用研究较早，广泛应用于有机污染土壤修复中，其中，电动-芬顿联合修复技术是研究较多的联合氧化技术。Yang 等[29]采用电动-芬顿联合修复技术修复酚污染土壤，按照芬顿实验要求设置条件，施加电场梯度为 1V/cm，处理时间 10 天，酚的去除和破坏率达 99.7%。电动-芬

顿联合修复技术也成功应用于修复柴油污染土壤中，当采用铁电极作为电极，加入 8%的双氧水和 0.1 mol/L 氯化钠时，经过 60 天的电动-芬顿处理，柴油的去除率达到 97%，显著高于单独的电动修复处理（55%）和芬顿处理（27%）。Fan 等[30]采用表面活性剂和氧化剂强化电动修复多氯联苯污染土壤，研究表明，将 2%的 Igepal CA-720 和 20%的过硫酸盐分别从阳极池和阴极池加入，零价铁作为催化剂，多氯联苯的降解效率最高可达 38%。

3.3.2 电动-生物联合修复技术

电动-生物联合修复技术兴起于 1996 年，Elektorowicz 和 Boeva 研究了采用电动过程向土壤微生物提供养分的可行性。研究表明，电动过程是一种向土壤中均匀传递氮化合物的有效方法，同时发现采用电动力学方法可以控制土壤含水率。Guo 等[31]探讨了电动-生物联合修复石油烃污染土壤的可行性。研究表明，随着电场强度的增加，石油烃的降解率逐渐增加，微生物-电动联合修复显著提高了石油烃的降解。可见，电动-微生物联合修复有机污染土壤是一种有效的，切实可行的修复技术。目前，针对烷烃、芳香烃等石油烃污染土壤，开展了大量的电动-微生物联合修复研究，从降解机理、电场设计到场地应用均开展了系统研究[32, 33]。

同时，电动-微生物联合修复也可用于修复重金属污染土壤。Maini 等[34]首次采用电动-微生物联合修复铜污染土壤，研究采用硫化细菌活化土壤中的重金属，然后采用电动修复过程将重金属从土壤中去除，经过 90 天硫化细菌的活化处理和 16 天的电动修复处理后，土壤中铜的去除率达到 86%。该方法也用于修复铜、铅和锌复合污染土壤中，采用氧化硫硫杆菌活化土壤中的重金属，采用 EDTA 溶液作为电解液电动修复可从土壤中高效去除重金属，其中铅的去除率可达到 92.7%[12]。可见，采用电动-微生物联合修复技术可有效用于修复重金属污染土壤，目前该技术已经用于重金属污染土壤的中式研究，并取得了较好效果[35]。

3.3.3 电动-PRB 联合修复技术

可渗透反应墙（PRB）-电动联合修复技术广泛应用于修复重金属污染土壤中，该技术修复重金属污染土壤的原理是在土壤的某处放入对重金属具有吸附固定能力的渗透反应材料，在电场作用下，将重金属污染物迁移到渗透反应墙

处吸附固定住[36]。目前，大量研究主要集中在可渗透反应墙的材料种类、放置位置、电动修复的电解液种类等[37, 38]。同时，研究表明，该技术也可有效应用于有机污染土壤修复，Wan 等[39]采用微米级 Pd/Fe 颗粒材料作为渗透反应墙，结合表面活性剂强化的电动修复技术修复六氯苯污染土壤。结果表明，采用联合修复技术显著提高了六氯苯的去除效率，为单纯电动修复效率的 4 倍。可见，采用电动修复结合渗透反应墙联合修复有机污染物是一种高效的且具有前景的修复技术。同时，有研究采用生物渗透反应墙结合电动土壤冲洗技术修复柴油污染土壤[40]，该研究表明，这是一种高效的修复技术，同时，可使土壤维持在一个微生物生长的合适 pH 值、温度和营养条件。经过两周的处理，污染物的去除率达到 30%，能量消耗为 70 $kWhm^{-3}$。

3.3.4 电动-离子交换膜联合修复技术

离子交换膜广泛应用于电渗析土壤修复中[41, 42]，采用离子交换膜可以阻止电极反应中产生的氢离子或者氢氧根离子进入土壤与重金属结合生成沉淀，加速重金属从土壤中去除。该技术也可与电动修复技术有机结合，避免了重金属离子在阴极附近生成沉淀，同时可以避免非靶标离子进入系统，从而提高电动修复效率[43]。Gao 等[14]采用阳离子交换膜结合循环电解液电动修复镉污染污泥，结果表明，在阳极使用阳离子交换膜可有效避免在循环电解液时镉离子再次进入污泥中。从而可有效提高电动修复效率。

3.3.5 电动-植物联合修复技术

电动-植物联合修复技术开始于 2003 年，该技术主要通过电场作用促进植物对重金属的吸收[44]。O'Connor 等[45]开启了此项联用技术手段的研究，在实验室条件下探讨了电动修复和植物修复联合使用修复重金属污染土壤的可行性。研究在实验室规模的反应器中的进行，分别修复了铜污染土壤以及镉和砷复合污染土壤，结果表明，电动-植物联合修复技术可用于修复重金属污染土壤，是一种非常具有前景的重金属污染土壤修复技术。目前，有较多关于电动-植物联合修复技术的研究，并已有研究将该技术用于修复重金属-有机物复合污染土壤中，该研究表明，在电场作用下可以促进植物生长，但是并没有显著提高植物重金属的吸收和有机污染物的降解，研究认为，电场施加的时间和电场频率可能对重金属的吸收和有机物的降解有重要影响[46]。

4. 结论

土壤电动修复技术最早报道于 1972 年，但在 1990 年之前研究较少。1990-2017 年期间，电动修复研究论文发表量呈上升趋势。美国是电动修复研究论文发表量第一大国，我国电动修复研究起步较晚，但是发展迅速，目前已是电动修复研究论文发表量第二大国。污染土壤电动修复研究主要围绕电动修复机理、联合修复技术和场地应用等 3 个方面，重点修复对象主要是重金属、有机污染物、盐和其他离子以及复合污染物等。开发便捷高效的电动修复场地应用技术将是今后的研究重点之一；电动修复技术与其他修复技术的有机结合，联合修复已成为电动修复研究的热点。

参考文献：

[1] M. Mari, M. Nadal, M. Schuhmacher, et al., Exposure to heavy metals and PCDD/Fs by the population living in the vicinity of a hazardous waste landfill in Catalonia, Spain: Health risk assessment[J]. Environment International, 2009, 35 (7): 1034-1039.

[2] A. Peña-Fernández, M.J. González-Muñoz, M.C. Lobo-Bedmar, Establishing the importance of human health risk assessment for metals and metalloids in urban environments[J]. Environment International, 2014, 72: 176-185.

[3] 袁立竹, 强化电动修复重金属复合污染土壤研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.

[4] Y.B. Acar, A.N. Alshawabkeh, Principles of electrokineticremediation[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27 (13): 2638-2647.

[5] J. Virkutyte, M. Sillanpää, P. Latostenmaa, Electrokinetic soil remediation — critical overview[J]. Science of the Total Environment, 2002, 289 (1–3): 97-121.

[6] R.F. Probstein, R.E. Hicks, Removal of contaminants from soils by electric fields[J]. Science, 1993, 260 (5107): 498-503.

[7] J.-S. Yang, M.J. Kwon, J. Choi, et al., The transport behavior of As, Cu, Pb, and Zn during electrokinetic remediation of a contaminated soil using electrolyte conditioning[J]. Chemosphere, 2014, 117: 79-86.

[8] A.P. Shapiro, R.F. Probstein, Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27 (2): 283-291.

[9] D.-m. Zhou, R. Zorn, K. Czurda, Electrochemical remediation of copper contaminated kaolinite by conditioning anolyte and catholyte pH simultaneously[J]. Journal of Environmental Sciences, 2003, 15 (3): 396-400.

[10] A. Alshawabkeh, A. Yeung, M. Bricka, Practical Aspects of In-Situ ElectrokineticExtraction[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125 (1): 27-35.

[11] G. Peng, G. Tian, Using electrode electrolytes to enhance electrokinetic removal of heavy metals from electroplating sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 165 (2): 388-394.

[12] K.-Y. Lee, K.-W. Kim, Heavy Metal Removal from Shooting Range Soil by Hybrid Electrokinetics with Bacteria and Enhancing Agents[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44 (24): 9482-9487.

[13] J.S.H. Wong, R.E. Hicks, R.F. Probstein, EDTA-enhanced electroremediation of metal-contaminated soils[J]. Journal of Hazardous materials, 1997, 55 (1-3): 61-79.

[14] J. Gao, Q. Luo, C. Zhang, et al., Enhanced electrokinetic removal of cadmium from sludge using a coupled catholyte circulation system with multilayer of anion exchange resin[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 234: 1-8.

[15] H.-H. Lee, J.-W. Yang, A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation[J]. Journal of Hazardous materials, 2000, 77 (1–3): 227-240.

[16] Z.-p. Cai, J. van Doren, Z.-q. Fang, et al., Improvement in electrokinetic remediation of Pb-contaminated soil near lead acid battery factory[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (9): 3088-3095.

[17] W.S. Kim, E.K. Jeon, J.M. Jung, et al., Field application of electrokinetic remediation for multi-metal contaminated paddy soil using two-dimensional electrode configuration[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21 (6): 4482-4491.

[18] B.K. Kim, G.Y. Park, E.K. Jeon, et al., Field Application of In Situ Electrokinetic Remediation for As-, Cu-, and Pb-Contaminated Paddy Soil[J]. Water Air and Soil Pollution, 2013, 224 (12): 1698–1708.

[19] A. Parker, M. Joyce, C. Boxall, A radioanalytical phantom for assessing the efficacy of electrokinetic decontamination of entrained radioactivity within

concrete media[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 300 (2): 769-777.
[20] Y.B. Acar, H. Li, R.J. Gale, Phenol removal from kaolinite by electrokinetics[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118 (11): 1837-1852.
[21] R.E. Saichek, K.R. Reddy, Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: a review[J]. Critical reviews in environmental science and technology, 2005, 35 (2): 115-192.
[22] M.T. Alcántara, J. Gómez, M. Pazos, et al., PAHs soil decontamination in two steps: Desorption and electrochemical treatment[J]. Journal of Hazardous materials, 2009, 166 (1): 462-468.
[23] G. Fan, L. Cang, G. Fang, et al., Electrokinetic delivery of persulfate to remediate PCBs polluted soils: Effect of injection spot[J]. Chemosphere, 2014, 117: 410-418.
[24] R. Fan, S. Guo, T. Li, et al., Contributions of electrokinetics and bioremediation in the treatment of different petroleum components[J]. CLEAN–Soil, Air, Water, 2015, 43 (2): 251-259.
[25] R. López-Vizcaíno, C. Risco, J. Isidro, et al., Scale-up of the electrokinetic fence technology for the removal of pesticides. Part II: Does size matter for removal of herbicides?[J]. Chemosphere, 2017, 166: 549-555.
[26] R. Lageman, Electroreclamation Applications in the Netherlands[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27 (13): 2648-2650.
[27] W.-S. Kim, G.-Y.Park, D.-H. Kim, et al., In situ field scale electrokinetic remediation of multi-metals contaminated paddy soil: Influence of electrode configuration[J]. ElectrochimicaActa, 2012, 86: 89-95.
[28] 郭书海, 黄殿男, 袁立竹, 等, 污染土壤电动修复原理与技术[M]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
[29] G.C.C. Yang, Y.-W. Long, Removal and degradation of phenol in a saturated flow by in-situ electrokinetic remediation and Fenton-like process[J]. Journal of Hazardous materials, 1999, 69 (3): 259-271.
[30] G. Fan, L. Cang, G. Fang, et al., Surfactant and oxidant enhanced electrokinetic remediation of a PCBs polluted soil[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 123: 106-113.

[31] S. Guo, R. Fan, T. Li, et al., Synergistic effects of bioremediation and electrokinetics in the remediation of petroleum-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2014, 109: 226-233.

[32] Y. Yuan, S. Guo, F. Li, et al., Coupling electrokinetics with microbial biodegradation enhances the removal of cycloparaffinic hydrocarbons in soils[J]. Journal of Hazardous materials, 2016, 320: 591-601.

[33] M. Zhang, S. Guo, F. Li, et al., Distribution of ion contents and microorganisms during the electro-bioremediation of petroleum-contaminated saline soil[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2017, 52 (12): 1141-1149.

[34] G. Maini, A.K. Sharman, G. Sunderland, et al., An Integrated Method Incorporating Sulfur-Oxidizing Bacteria and Electrokinetics To Enhance Removal of Copper from Contaminated Soil[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34 (6): 1081-1087.

[35] H.-A. Kim, K.-Y.Lee, B.-T. Lee, et al., Comparative study of simultaneous removal of As, Cu, and Pb using different combinations of electrokinetics with bioleaching by Acidithiobacillusferrooxidans[J]. Water Research, 2012, 46 (17): 5591-5599.

[36] H.I. Chung, M. Lee, A new method for remedial treatment of contaminated clayey soils by electrokinetics coupled with permeable reactive barriers[J]. ElectrochimicaActa, 2007, 52 (10): 3427-3431.

[37] C. Yuan, C.-H.Hung, K.-C. Chen, Electrokinetic remediation of arsenate spiked soil assisted by CNT-Co barrier—The effect of barrier position and processing fluid[J]. Journal of Hazardous materials, 2009, 171 (1–3): 563-570.

[38] C.-H. Weng, Y.-T. Lin, T.Y. Lin, et al., Enhancement of electrokinetic remediation of hyper-Cr(VI) contaminated clay by zero-valent iron[J]. Journal of Hazardous materials, 2007, 149 (2): 292-302.

[39] J. Wan, Z. Li, X. Lu, et al., Remediation of a hexachlorobenzene-contaminated soil by surfactant-enhanced electrokinetics coupled with microscalePd/Fe PRB[J]. Journal of Hazardous materials, 2010, 184 (1-3): 184-190.

[40] E. Mena, C. Ruiz, J. Villaseñor, et al., Biological permeable reactive barriers coupled with electrokinetic soil flushing for the treatment of diesel-polluted clay soil[J]. Journal of Hazardous materials, 2015, 283: 131-139.

[41] T.R. Sun, L.M. Ottosen, J. Mortensen, Electrodialytic soil remediation enhanced by low frequency pulse current – Overall chronopotentiometric measurement[J]. Chemosphere, 2013, 90 (4): 1520-1525.

[42] L.M. Ottosen, H.K. Hansen, S. Laursen, et al., Electrodialytic Remediation of Soil Polluted with Copper from Wood Preservation Industry[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31 (6): 1711-1715.

[43] W.-S. Kim, S.-O.Kim, K.-W. Kim, Enhanced electrokinetic extraction of heavy metals from soils assisted by ion exchange membranes[J]. Journal of Hazardous materials, 2005, 118 (1–3): 93-102.

[44] C. Cameselle, R.A. Chirakkara, K.R. Reddy, Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: Status and opportunities[J]. Chemosphere, 2013, 93 (4): 626-636.

[45] C.S. O'Connor, N.W. Lepp, R. Edwards, et al., The Combined Use of Electrokinetic Remediation and Phytoremediation to Decontaminate Metal-Polluted Soils: A Laboratory-Scale Feasibility Study[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, 84 (1-2): 141-158.

[46] R.A. Chirakkara, K.R. Reddy, C. Cameselle, Electrokinetic Amendment in Phytoremediation of Mixed Contaminated Soil[J]. ElectrochimicaActa, 2015, 181: 179-191.